部会報告

シールドトンネルおよび山岳トンネル工事用建設機械の現状と将来の展望

—アンケート調査結果報告書（抜粋版）—

機械部会トンネル機械技術委員会

1. はじめに

トンネル機械技術委員会では，（社）日本建設機械化協会機械部会の部会運営の基本方針に沿って，シールドトンネル工事及び山岳トンネル工事における建設機械などの現状と将来の展望などについてアンケート調査を実施してきた。

本報告書（抜粋版）は，平成10年度に実施したアンケート調査をもとに，さらにコストパフォーマンスへの分析考察を行い取りまとめたものである。

（1）目　的

建設の施工のみならず，建設資機材の生産のさらなる機械化も視野に入れて，安全性の向上および環境との調和を図りながら，機械技術的な方策を中心として，建設の生産性の向上（建設生産におけるコスト縮減あるいはコストパフォーマンス改善）に貢献することを目的に検討した。

アンケート調査に当たっては，ユーザサイドのニーズをベースに施工法・技術面からの機械化に対する改善要望や機械設備の要求機能，安全性と環境との調和など，21世紀に向けてトンネル施工と機械化のあるべき姿と課題について取りまとめたものである。

アンケート調査項目は以下のとおりである。

① 情報化・装置化施工について
② 自動化・ロボット化について
③ 機械設備の要求機能・性能について
④ 工事の安全について
⑤ 環境負荷の低減について

2. 調査方法

（1）調査対象

アンケート調査は発注者，施工会社，機械メーカを対象とし，調査対象については工事の規模，工法種別などに主眼を置いて調査を行った。

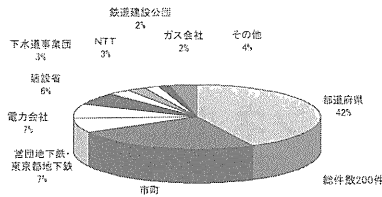
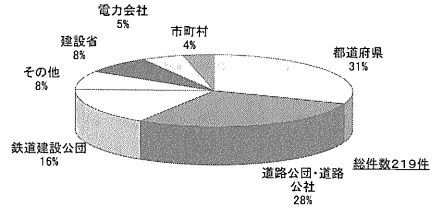
（2）シールドトンネル工事調査結果

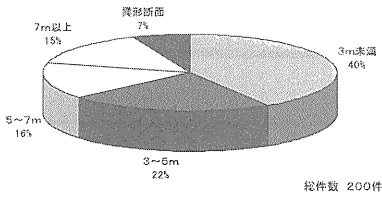
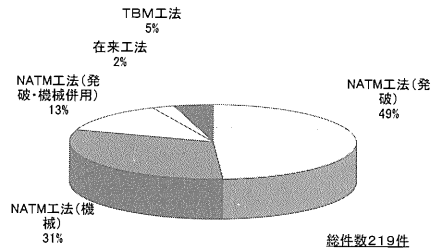
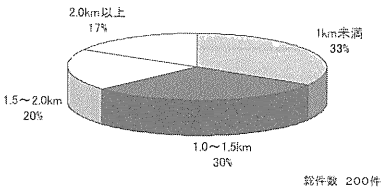
アンケート対象現場は，協会の会員各社が現場施工中ないしは最近施工を完了したシールド現場から抽出した。アンケートの結果，有効回答件数は200件となった。その工事の内訳を表—1，表—2および図—1～図—5に示す。

表—1　掘削外径別件数（かっこ内％）

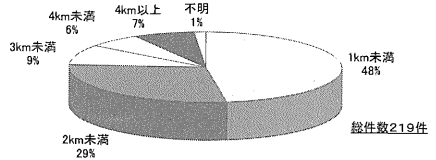
掘削外径	泥水式	泥土式	その他	計
3 m 未満	18(9.0)	64(32.0)	0(0.0)	82(41.0)
3～5 m	16(8.0)	29(14.5)	0(0.0)	45(22.5)
5～7 m	10(5.0)	21(10.5)	0(0.0)	31(15.5)
7 m 以上	19(9.5)	10(5.0)	0(0.0)	29(14.5)
異形断面	6(3.0)	4(2.0)	3(1.5)	13(6.5)
計	69(34.5)	128(64.0)	3(1.5)	200(100.0)

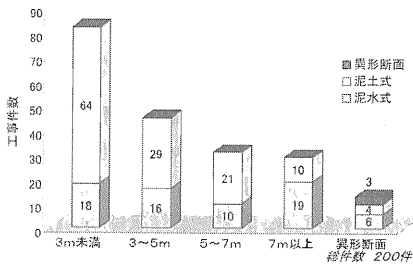
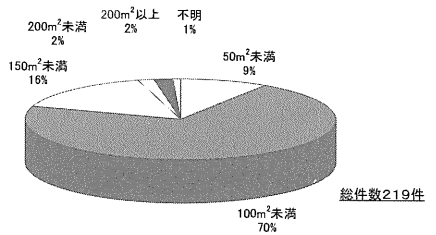
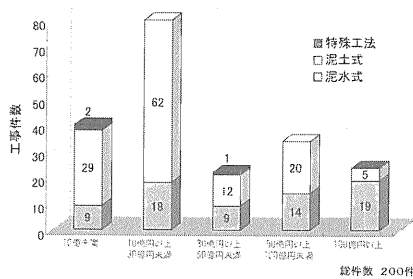
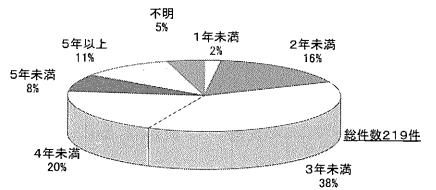
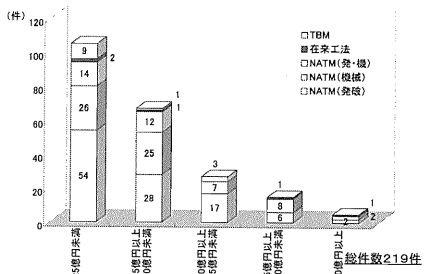
表—2　掘進距離別件数

掘削外径	泥水式	泥土式	その他	計
1 km 未満	17(8.5)	48(24.0)	2(1.0)	67(33.5)
1.0～1.5 km	18(9.0)	40(20.0)	1(0.5)	59(29.5)
1.5～2.0 km	15(7.5)	25(12.5)	0(0.0)	40(20.0)
2.0 km 以上	19(9.5)	15(7.5)	0(0.0)	34(17.0)
計	69(34.5)	128(64.0)	3(1.5)	200(100.0)

図―1　発注者別工事件数割合

図―2　掘削径別件数割合

図―3　掘削距離別件数割合

図―4　掘削外径と工法別工事件数

図―5　請負金額別工事件数

図―6　発注者別工事件数割合

図―7　工法別工事件数割合

図―8　掘削延長別工事件数割合

図―9　掘削断面積別工事件数割合

図―10　工期別工事件数割合

図―11　請負金額別工事件数

(3)　山岳トンネル工事調査結果

アンケート対象現場は，協会の会員各社が現在施工中ないしは最近施工を完了した山岳トンネル現場から抽出した。アンケートの結果，有効回答数は219件となった。その工事の内訳を図―6～図―11に示す。

3．シールドトンネル調査結果

（1）「機械設備の要求機能・性能」について（シールドトンネル編）―調査結果の分析―

（a）目　　的

本アンケートではシールド工法の機械設備の要求機能と性能向上について，施工者およびメーカにアンケート調査を実施し，将来の機械設備のあるべき姿を把握するとともに基本的なコンセプトイメージを創ることに役立てることを目的とする。

（b）アンケート内容

現在主流である泥土圧シールド工法および泥水加圧シールド工法を中心として，要求品質項目に対する新技術の実施状況や将来の必要性を機械設備および機能・性能別に調査した。

新技術の実施状況調査に当たっては，各シールド工法の要求品質項目に対する機械設備および機能・性能の項目から複数回答可能としてアンケートを実施した（表―3)。

（c）アンケート結果

（i）全体を通した結果

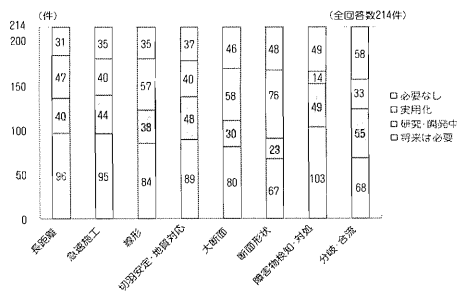
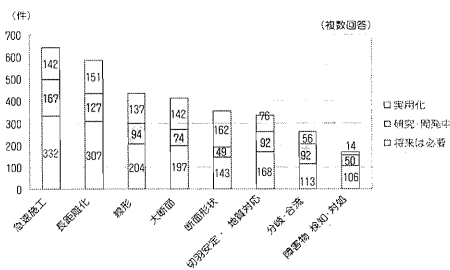
① 新技術に対する取組み状況（図―12）

全有効回答数214件の内，各要求品質項目に対する機械設備・装置などについて新技術の実用化段階にあるものが21%，研究開発中のものが19%，将来は新開発が必要と考えているものは40%であり，シールド工法における新技術の開発における関心が高いことを示している。

特に矩形，多円形などの最適断面形状や大断面シールドや線形対応に対する新技術の実用化が多い。障害物の検知とその対処方法については，現在の実用化件数は少ないが新技術開発の期待が大きい。

以上の結果は，我が国におけるシールド工法は，企業者，施工会社および機械設備メーカなどが一体となって新工法，新技術，新装置の開発に力を注ぎ，高度な施工管理のもとで施工されてきており世界的に見ても最先端の技術であることを裏付けている。

表―3　アンケート項目

シールド工法の要求品質項目	機械設備および機能・性能
・急速施工	A．カッタ系（電動，油圧，トルク，回転数，ビット交換など）
・長距離施工	B．推進系（推力，本数，ストローク，速度など）
・掘削線形	C．ずり排土
・大断面掘削	D．セグメントエレクタ
・断面形状の多様化	E．地上設備
・切羽安定・地質対応	F．裏込め注入設備
・分岐・合流	G．二次覆工，H．構内搬送，立坑搬入，
・障害物検知と対応	I．テールシールJ．方向制御装置，K．自動運転，L．添加材（作泥設備）M．前方探査・切羽安定，N．換気，O．測量，P．その他

図―12　新技術に対する取組み状況

図―13　個別要求品質項目に対するアンケート結果

② 個別要求品質項目に対するアンケート結果（図―13）

急速施工，長距離対応，線形対応および大断面シールドの技術開発が盛んであり，これらの技術は今後も必要と考えられている。建設コスト縮減に対しては長距離を安全確実に高速施工することが大きく寄与することを裏付けていると思われる。

（ii）個別要求品質項目と機械装置などの新技術のアンケート結果

以下は個別の要求品質項目に対してどのような機械設備や装置の開発に取組んでいるかのアンケート結果である（図―14)。

シールド工法の要求品質に対する機械設備・要素別の実用化新技術はカッタ系，方向制御装置，推進系，セグメントエレクタ，テールシールや掘削土砂の搬送装置などの実用化が多い。

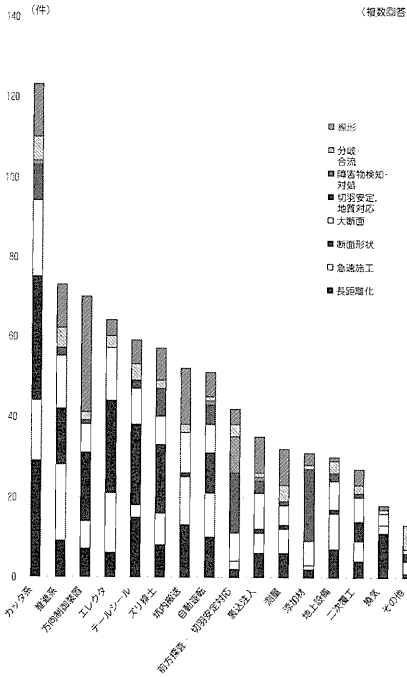
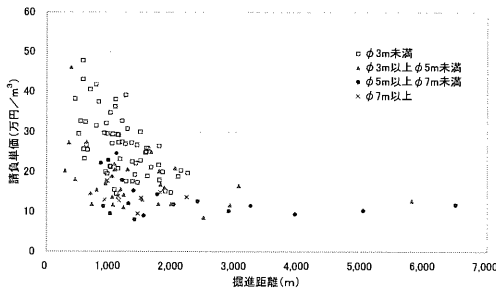
（d）考　　察

（i）現状の把握

今回のアンケート調査では，シールド工事においての機械設備の要求機能・性能の向上について広く調査した。その結果，大断面，大深度，長距離，急速施工のテーマに対して新技術開発の要望が高いことが分かった。

アンケート結果から掘削延長に対する掘削土(m^3)当たりの請負金額を図―15に示す。

掘削延長が長くなるほど掘削土(m^3)当たりの施工単価は下がることがわかる。

図―14に示すとおり，急速施工，長距離，線形に対する新技術開発が盛んであることはシールド施工の長距離化

図―14 機械設備・要素別の実用化新技術の実施状況

図―15 シールド工事請負単価(掘削外径別)

によって,施工コスト低減効果が大きいことを裏付けていることを示している。

(ii) 課 題

今後は更にニーズの高い項目について重点的に新技術開発や導入などの課題や制約,開発体制などについて検討し,生産性向上を図るべく機械設備の要求機能・性能の向上に対する基本的なコンセプトイメージを築きあげる必要がある。

(2) 情報化・装置化施工について(シールドトンネル編)―調査結果の分析―

(a) 調査の目的

生産性の向上を計る方法として「情報化・装置化」が重要な要素となるが,土木工事の場合には,注文生産でしかも現場生産が主体となるため,他産業に比較して,

表―4 アンケート調査項目

	質問項目	回答選択肢
1	採用した情報化・装置化システム	<情報化> 泥水管理,裏込注入管理,土圧管理,環境計測,位置測量,掘削土量管理,線形管理,ビット摩耗検知,切羽崩壊探査,入坑者管理,立坑変位計測,地盤変動計測,出来型管理,自己診断,切羽障害物探査,切羽土質探査,その他
		<装置化> シールド遠隔操作,自動裏込め注入,自動方向制御,土砂圧送装置,送排泥管施設装置,ボルト増締装置,搬入装置,自動組立て,自動搬送装置,軌条施設装置,半自動組立て,その他
2	システム採用の目的	安全性の向上,品質精度の向上,省力化,作業環境の改善,工程短縮,コスト縮減,施主の指定,会社の技術PR,技術開発,その他
3	採用システムの操作場所	中央・総合管理,中央・専用管理,坑内・総合管理,坑内専用管理,機側管理,その他
4	システムの実用化度	実用化完了,開発完了,開発中
5	採用目的の達成度	十分効果有り,やや効果有り,変わらない,あまり効果なし,全く効果なし
6	今後の課題	安全性の向上,品質精度の向上,操作・機能の簡易化,作業環境の向上,工期短縮,省資源・省エネルギー,コスト縮減,作業量・作業工数の削減,その他

「情報化・装置化」が遅れている印象は否めない。

今回,土木工事の「情報化・装置化」推進・普及の参考資料とすべく,比較的情報化の進んでいると思われるシールドトンネルでの実態をアンケート調査した。

(b) アンケート内容

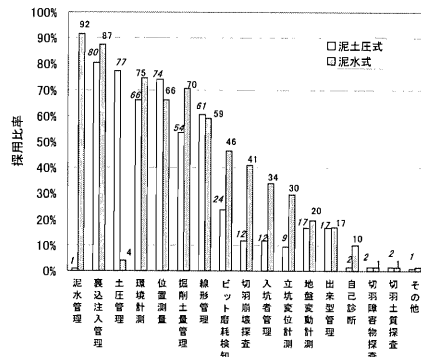
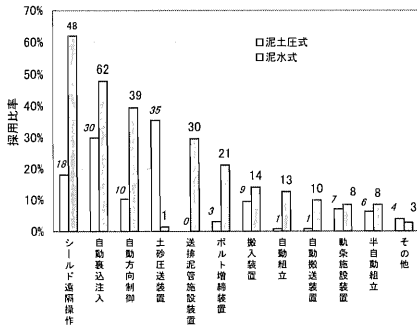
アンケートは,工事で採用した「情報化・装置化」に関連するシステム・装置について,表―4の調査票により選択式で下記の内容について質問した。

(c) アンケート結果

(i) アンケート現場

アンケート対象は,(社)日本建設機械化協会のトンネル機械技術委員会の参加各社が,現在施工中ないしは最近施工したシールド工事の中から抽出し実施した。アンケートの有効回答件数は200件で,結果をまとめて下記に紹介する。

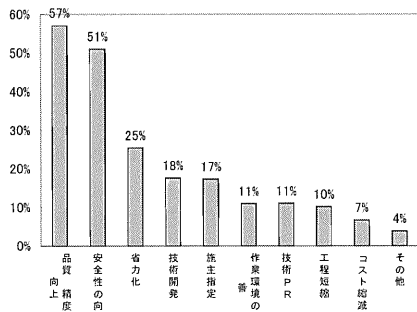
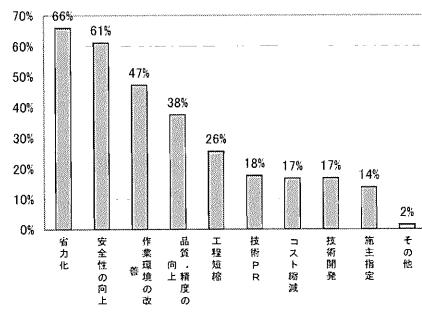
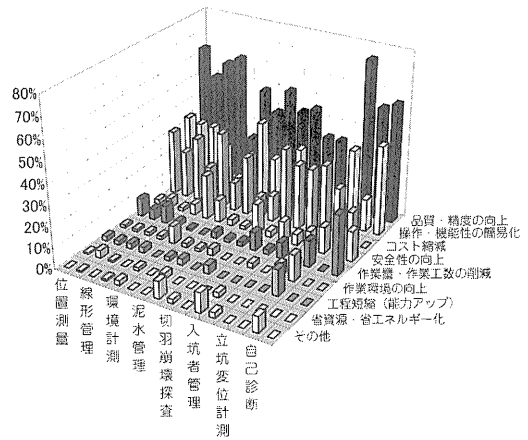
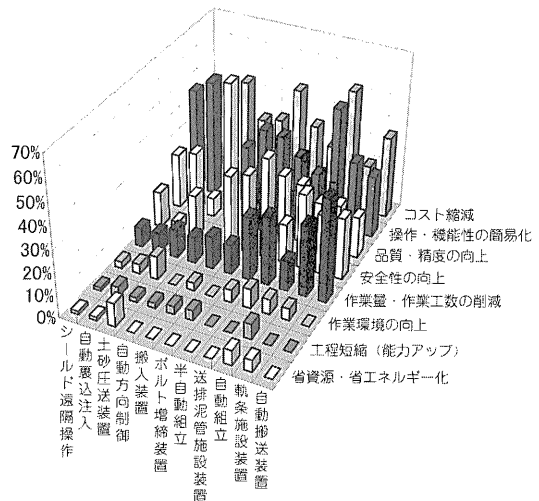
(ii) 採用システム

現場で採用されている「情報化・装置化」に関連するシステム・装置の名称と採用件数をまとめると図―16

図―16 情報化システム採用比率

図―17　装置化システムの採用比率

および図―17 のようになる。

工種別に見ると情報化・装置化システムとも，泥水式での採用比率が泥土圧式より高いことが分かる。これは，泥水式が掘削土排出が配管による流体輸送のため，ポンプの運転制御に自動化技術を必要としたためで，掘進機や周辺機器の自動化を取込みやすい環境があったからといえる。泥土圧式でも配管輸送の土砂圧送装置の採用が 35％あることで，泥水式と同様の情報化・装置化が進んでいく状況にあると観測される。

（iii）　システム採用の目的

システムの採用目的として回答した現場の割合を図―18，図―19 に示す。数値は複数回答でのシステム全体の平均値を示している。

図―18　情報化システム採用目的（全体の平均値）

図―19　装置化システムの採用目的（全体の平均値）

図―20　情報化システムの今後の課題

図―21　装置化システムの今後の課題

（iv）　採用システムの課題

システムに対する今後の課題についてのアンケート結果を図―20 と図―21 に示す。全体の傾向として品質の向上，操作の簡略化，コストの低減が大きな課題として挙げられている。

（d）　考　　察

（i）　採用の傾向

① 情報化・装置化とも機種による大きな差は見られないが，泥水式での採用比率が土圧式より高い傾向にある。

② また，土圧式でも土砂圧送システムの採用が 30％を超えている。土砂圧送システムの採用が進めば，土圧式と泥水式のシステム的な差は無くなるものと考えられる。

（ii）　システム採用の目的

システムを採用する目的で多いのが，品質の向上，安全性の向上，生産性の向上（省力化・工期短縮・コスト低減）であるが，技術開発・施主指定・技術PRの項目も比率が高く，技術競争的な側面の強さも窺える。

（iii）　今後の課題

今後の課題として多いのが，システムの精度の向上，操作の簡易化，コスト縮減と続いている。これらの項目はお互いに関連するもので，今後システムの在り方やシステムの必要機能，目的などを見直し，コストパフォーマンスの高い装置・システムにする必要があろう。

（3）「環境負荷の低減」について（シールドトンネル編）—調査結果の分析—

（a）　目　　的

環境負荷には「作業当事者への環境負荷」と，「第三者（近隣住民，周辺地域）への環境負荷」があるが，今回の調査では後者つまり「第三者（近隣住民，周辺地域）への環境負荷」について調査を行った。

ISO 14001 認証取得の動きが全国的に広がってきており，短期的作業現場といえども環境に配慮する気運が高まっている。住民，地域との接点である各工事現場において，騒音・振動，排出ガス，省エネルギー，排出土といった項目につき，シールドトンネルでの問題点とそれに関連する機械，対応等について調べた。今回はそのうち騒音・振動，排出土について報告する。

（b）　アンケート内容

①　騒音・振動について

・工種ごとに，住民からの苦情の有無，改善の要否，該当する機械の調査

・対応方法

②　排出土について

・建設発生土の利用方法，利用用途の調査

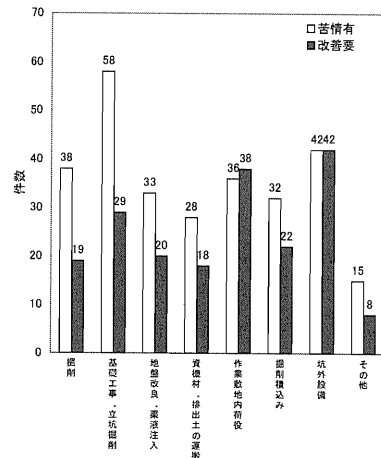
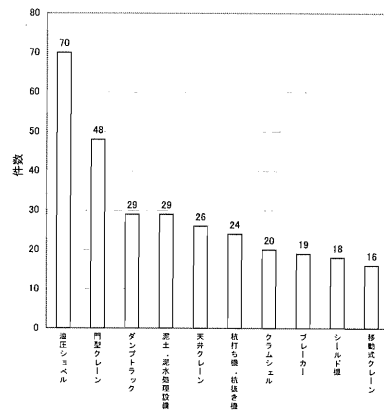
・建設廃棄物の処理方法，利用用途の調査

（c）　アンケート結果

（i）　騒音・振動について

①　環境への影響

図—22，図—23より，工種設備別で一番苦情件数が多いのが「基礎工事，立坑工事に伴う振動・騒音」(58件，全件数の28%）であり，これに関連する機械は油圧ショベル，基礎工事機械（杭打ち・杭抜き機械，地中連続壁機械他）等が挙げられる。以下「坑外設備による騒音・振動」，「掘削による騒音・振動」，「作業敷地内荷役に伴う騒音・振動」が40件前後でこれに続く。

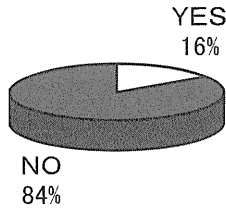
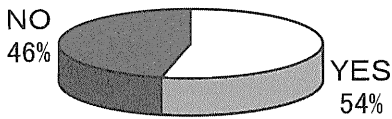
施工者として改善要とした件数が最も多いのが「坑外設備による騒音・振動」（42件）でこれに関連する機械は泥土・泥水処理設備，裏込め注入プラント，添加材プラント等のプラント設備，送風機，門型・天井クレーン等が挙げられる。以下「作業敷地内荷役に伴う騒音・振動」，「基礎工事・立坑掘削に伴う騒音・振動」がこれに続く。

図—22　騒音・振動による環境への影響

図—23　騒音・振動に関連する機械

周辺住民からの苦情と施工者としての改善要の認識については，「坑外設備による騒音・振動」，「作業敷地内荷役に伴う騒音・振動」に関しては両者ほぼ等しいが，「基礎工事・立坑掘削に伴う騒音・振動」，「掘削に伴う騒音・振動」に関してはかなり乖離がある（住民からの苦情が施工者としての改善要の認識の倍ある）。

騒音・振動に関連する機械の中では，油圧ショベルが70件で一番多い。防音対策が取りにくい基礎工事，立坑掘削で油圧ショベルが使われることが多いため，苦情が多くなっていると思われる。次が門型クレーンであるが，同じ用途の天井クレーンと併せれば74件と，油圧ショベルを抜いてしまうことになる。これら荷役設備は使用頻度が高く，昼夜工事の多いシールド工事において対応策の取り難い機械の一つである。

②　影響の評価及び現場での対応

図—24より，騒音・振動の基準・規制については約8

図―24　騒音・振動の基準・規制が厳しすぎる

図―25　騒音・振動の基準・規制をクリアしているのに苦情有

割が容認しており，現行の規制が厳しすぎるとは捉えていない。しかし，図―25より基準・規制をクリアしているのに苦情があると6割が回答している。これは，基準・規制をクリアしていても，苦情はそれに関係なく周辺住民の感覚・感情によるものであり，基準・規制さえクリアすれば良いということにはならないことを示している。

アンケートによれば，防音ハウス，防音壁，防音扉等の防音設備は設計に含まれていることが多く，これに基づき対応しているケースが多い。発生源の機械に対する対応は低減処置，設置場所の考慮，作業時間の考慮において約7割強が実施しており，シールド工事では比較的積極的に対応していると思われる。「地元近隣住民への説明会等での了解」については，約9割の現場で実施している。

（ii）　排出土の処理について

①　発注者の指定

発注者による処分方法の指定は，自由処分と指定処分がほぼ半数づつとなっている（図―26参照）。しかしながら，土圧式シールドと泥水式シールドを区分してみると，図示していないが，土圧式では73％が指定処分であり，泥水式では逆に57％が自由処分となっており，シールド形式による違いが出ている。

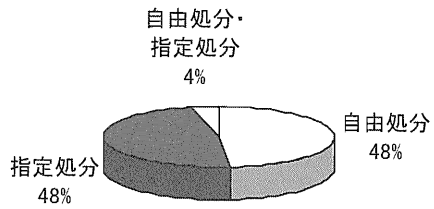
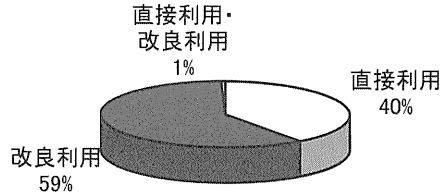
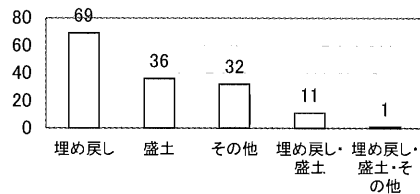
②　建設発生土

利用できる場合の利用方法として，手を加えずそのままの状態で直接利用が40％，各種の方法で処理し，状態を改良して利用が約60％となっている（図―27参照）。

再利用の用途として，埋戻し69件，盛土36件，埋戻し＋盛土11件，その他33件となっている（図―28参照）。埋戻し及び盛土が全体の78.5％であり，予想通りの結果となっている。

③　建設廃棄物

廃棄物の種類は，図―29に示すように汚泥132件，建設廃材25件，汚泥＋建設廃材31件，その他1件であり，圧倒的に汚泥が多く，シールド工法に付属するものであることは明確である。

処理方法としては，図―30に示すように，委託処理85％（161件），自己処理10％（19件），委託処理＋自己処理5％（9件）となっており，全体の85％が委託処理である。しかしながら，残り15％と割合は少ないが自己処理もあり，今後の動向が注目されるところである。

図―26　発注者の指定

図―27　発生土　利用方法

図―28　発生土　再利用の用途

図―29　廃棄物の種類

図―30　廃棄物　処理方法

（d）考　察

（i）騒音・振動について

シールド工事において防音壁，および防音ハウスによる防音設備が完備されるのは本工事時（シールド掘進開始時）であるため，どうしても基礎工事，立坑掘削時には仮の防音設備（良くても防音壁だけ）となってしまう。このため基礎工事，立坑掘削に伴う騒音・振動の苦情が多い。これらの対応としては低騒音，低振動の機械の選定とともに，油圧ブレーカなど構造的に解消できないものは，新機構，新工法の開発が必要である。

周辺住民からの苦情と施工者としての改善必要の認識については，坑外設備，作業敷地内荷役は昼夜を問わず稼働する場合が多いため，施工者としても環境に配慮が必要との認識があり高くなっていると思われる。一方，基礎工事・立坑掘削は，前述の如く対策が取り難いため，意識の上で一歩引いた感があり，住民意識と乖離が生じたものと思われる。

（ii）排出土の処理について

現在のシールドは大部分が密閉機械式であり，その掘削土の性状はほぼ汚泥状態である。しかし，今回のアンケートで，建設発生土に対しかなりの数の回答を得た。これは，量の多寡を問わず，建設発生土が発生すれば，建設発生土の項目に回答するようになっているためである。したがって，比率は件数に対するものであり，必ずしも量の比を表していないと考えるべきである。このような発生土として，泥水式シールドにおける一次処理土，立坑掘削における発生土等があると考えられる。

建設副産物は環境に大きな影響を持ち，再利用率の向上が要求されている。そのためには，発注条件の改善，自助努力が必要である。今回のアンケートにその一端は見受けられるが，今後更なる改善，努力をする必要がある。

（4）「工事の安全」について（シールドトンネル編）
—調査結果の分析—

（a）目　的

都市の過密化が進むなかで，最近のシールド工事は大深度・長距離・急速施工が求められる状況にある。これに伴い，シールド機や仮設備等の自動化・システム化が進み，機械設備の取扱いが簡素化される反面，メンテナンスは煩雑化する一途である。

当然ながら，周辺環境や作業環境に対する対策も万全を求められることになる。そこでこれらの現状を踏まえ，最も危険要素が考えられるシールド機，坑内運搬設備，坑内換気設備について工事中における安全管理状況の調査を実施した。

（b）アンケート内容

アンケート項目を表—5に示す。

表—5　アンケート項目

項　目	調　査　内　容
シールド機	取扱説明書の活用状況，保守点検の実施状況，セグメント搬送組立て
坑内運搬設備	最大勾配，最小曲線半径，坑内運行管理，自動運転
坑内換気設備	坑内有害ガスの有無，換気の方法
安全重点対策	特に策定する工種，機械設備

（c）アンケート結果

（i）シールド機

①　メーカ取扱説明書の活用方法

シールド機を現地搬入時にメーカから構造，取扱方法等を掲載した取扱説明書が添付されるが，90%以上が有効に活用している。

②　シールド機の保守点検

シールド機の性能を維持し，過酷な作業条件下で使用するためには，日常の点検・定期点検が重要である。日常の保守点検は，シールド掘進施工業者の作業長や作業員（シールド機の運転手）によって行っているが，月例点検・年次点検になるにつれて，作業所機械担当者やメーカによって実施している。シールド機の構造が年々複雑化している状況で，保守点検には一層の配慮が必要となる。

③　セグメント搬送・供給・組立て

（イ）セグメント搬送・供給・組立て方法

シールド工事における発生災害のうちセグメント搬送・供給・組立て中の事例が最も多い。近年，東京湾横断道路をはじめとする大口径・大深度シールド工事の普及に伴い，立坑への搬入からセグメント組立てまでを全自動で施工している事例もあるが，自動化可能なシールド外径に限度があり（約6.0m以上），その割合はわずか5%である。

（ロ）セグメント自動（半自動）搬送・供給・組立て時の駆動範囲への立入禁止方法

セグメント組立て等の自動化に伴い，装置付近における作業員等の挟まれ・巻込まれを防止するための安全装置が重要視される。装置が駆動する際に，表示灯やブザーにより付近への立入禁止を喚起する場合が多いが，自動運転の場合には操作者による緊急時の停止が不可能となるため，近接スイッチ等の取付けによる自動停止装置が必要となる。また，セグメント自動組立て装置等に近接スイッチを取付け，自動停止した場合のインタロックの解除方法としては，「周囲の安全を確認した後に手動で行う」が100%であり，新規開発機械に対しての対応が窺える。

（ハ）セグメント組立て足場およびシールド機内作業足場

シールド機内の狭隘な場所でセグメントを組立てるために後方デッキの使用や専用組立て足場を設置するが，

電装品や油圧部品を組込んだあとでは，手摺りや昇降用梯子の設置変更ができない場合もあるので本体仕様を決定する際にあらかじめ詳細計画までを行うことが肝要である。小口径シールドにおける軽量なスチールセグメントから，1ピース10tの大口径RCセグメントの取扱いに対する如実なアンケート結果となっている。また，中小口径泥土圧シールドにおいてやむをえず，スクリューコンベヤを足場とする場合があるが，スクリューコンベヤ上に「専用足場を設置する」が65件（53%），「設置しない」が58件（47%）となっている。

④　シールド機組立て解体

シールド機の組立て・解体は重量物を扱う作業で，万全な計画・管理を行わなければならない。特に，シールドが地中到達の場合，解体は全てが坑内作業となり，最も危険であり災害発生率も高い。組立て工事は，組立て精度や電気機器の配線，油圧機器の配管等，作業の正確さが要求されるため，シールド機製作メーカを主体として実施されているが，解体工事はそれほど作業の精度を必要とせず，掘進完了直後の坑内作業の熟練度からシールド掘進施工業者を主体として行われている。組立て・解体作業に必要なクレーンは，作業所の直接管理で行われている。組立て・解体作業標準は，メーカで作成したものを工事ごとに作業条件を組入れて手順書としている。作業足場については，組立て・解体時とも，固定足場が多く使用されている。作業範囲内の区分は作業区域全体あるいは作業箇所のみを立入禁止としている。

（ii）　坑内運搬設備

①　シールド線形

シールドの縦断勾配は，0～10‰が163件（78%）であり施工性を重視した計画がされているが，31‰以上が7%（16件）あり，河川横断や埋設構造物，地質変化への対応等，縦断線形を維持できない傾向が見られる。平面線形は，＞101 mRが35%（75件），51 mR～100 mRが23%（47件），31 mR～50 mRが8%（16件），21 mR～30 mRが13.5%（28件），16～20 mRが9.2%（19件），＜15 mRが22件で30 mR以下の急曲線は30%以上あり（69件），施工の困難性を示している。

②　坑内運搬設備の種類

坑内に軌条を敷設して動力車（バッテリロコ）で台車やずりトロを牽引する方法が大半を占めているが（98%：204件），最近，軌条を使用しないタイヤ工法が開発された。本調査段階では全体の2%（3件）である。

③　動力車の運転方法と型式

動力車の運転方法は，運転手が直接運転席で操作する手動運転が90%（187件），であるが熟練者不足対策や長距離施工対応として自動運転（20件：10%）が普及しつつある。

動力車の型式は従来型（161件：78%）に対し，急勾配や自走台車，自動運転対応として，サーボロコの採用（46件：22%）が増加している。

④　動力車の重量とブレーキの構造

動力車の重量は，2tが48%（95件），4tが16%（33件）で全体の60%以上を占め，中小口径シールドが大半であることを示している。ブレーキの構造は，従来の手動ブレーキと電磁ブレーキが半数以上を占めているが，サーボロコの普及により，サーボブレーキや油圧ブレーキ，トラックブレーキを併用するケースが増加している。

⑤　自動運転時の緊急停止装置

自動運転時の緊急停止方法として，障害物センサ15件，オーバーランセンサ15件，接触停止式バンパ23件，緊急停止押しボタン36件が取付けられている。障害物センサの感知位置は，直線部で15 m→6 m→3 mで感知するケースが多い。曲線部では6 m→3 mのケースが多く採用されている。

⑥　坑内制限速度の設定

シールド坑内において動力車を運行する場合，坑内最高速度を設定する。設定速度は，7～8 km/hが51%（106件）で最も多く，ついで5～6 km/h，6～7 km/hとなっている。

（iii）　坑内換気設備

坑内換気は，過去の坑内爆発事故等から，その重要性を認識しなければならない。施工前に十分な現地調査を実施し，危険有害ガスの性状や濃度を把握するとともに，坑内における適切な諸設備計画を行う必要がある。

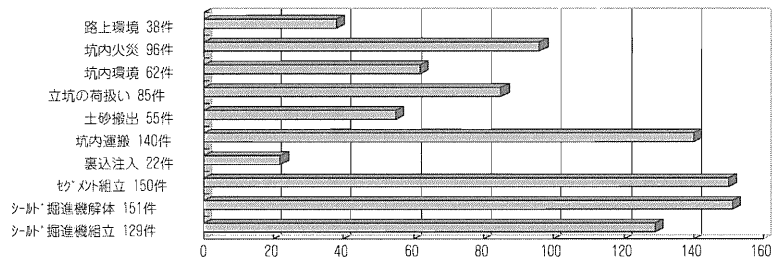
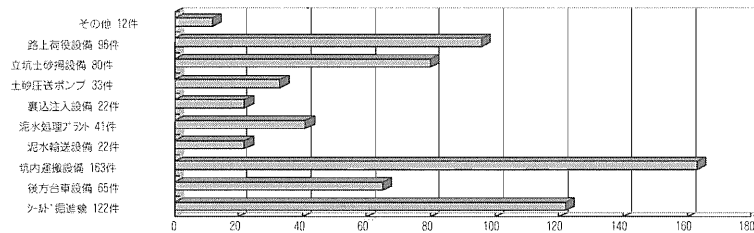
①　坑内危険有害ガスの有無と性状

- 坑内危険有害ガスの有無→あり：39件（19%），なし：168件（81%）
- 坑内危険有害ガスの性状→溶存型：35件（調査全体の17%），噴発型：4件（2%）
- 坑内危険有害ガスの種類→酸化炭素9件（調査全体の4.3%），メタン21件（10.1%）

②　坑内防爆対策

坑内防爆対策は，坑内の危険有害ガスの性状や量により設備を決定しなければならない。事前調査の結果，噴発型で量も多いことが予想される場合には，坑内全域を防爆設備とし，十分な換気を行う。溶存型で量も比較的少ないと予想される場合には，限定防爆（機内防爆等）とするか，十分な換気で対応する場合もある。また，危険有害ガスの発生が予想される場合には，坑内ガス自動測定装置を設置するとともに各々のガスの許容値を設定し，避難態勢の基準等を定め，関係者全員に周知しておかなければならない。

③　換気設備の使用状況

換気ファンの型式は，大風量を高圧で送気可能な軸流式が35%（72件）で大・中断面シールドに使用され，少

図—31 安全重点対策を策定する機械設備

図—32 安全重点対策を策定する工種

風量を高圧で送気するガイドベーン型遠心力式ファンが65％（135件），小口径断面シールド使用されている。上記ファンのうち，サイレンサ付きの機種が103機種，冷却装置付きの機種が3機種含まれる。送気（排気）する風管の種類は，小口径シールドに使用される遠心力ファン用の鋼管（ϕ200〜ϕ300程度），大風量送気用のビニール（ϕ600〜ϕ1,500 mm；耐火性を含む），立坑換気や排気専用に用いられるエアダクト等がある。

（iv） シールド一次覆工における安全重点対策

シールド工事の一次覆工において，安全重点対策として策定する項目を「機械設備」「工種」に区分して調査した結果を図—31および図—32に示す。

（d） 考　察

（i） 現状の把握

前項の「安全重点対策を策定する工種」および「安全重点対策を策定する機械設備」にみられるように，工種においては，「シールド機組立て・解体」と「坑内運搬」「セグメント組立て」が，また機械設備においては，「坑内運搬設備」と「シールド掘進機」が群を抜いていることを重要視せねばならい。

シールド機の組立て・解体作業において，解体作業における事故・災害の発生率が解体作業に多く，エレクタ解体中の災害が最も多いように，手順を策定して手順通りの作業を行うことが事故・災害を未然に防ぐ要因といえる。やむを得ず，作業状態を変更する際にも，関係者全員で変更の確認をした後に実施することが，すべての作業に共通すると考える。

（ii） 課題と対応

大断面・大深度・長距離・自動化するシールド工事のなかで，「安全管理」は，その内容を検討し，作業標準を見直さなければならないことは事実である。

しかし，現在発生している事故・災害の大半が取扱運搬災害であり，在来型の「挟まれ・巻込まれ」であることも重要視しなければならない。中小口径の狭隘な坑内においての「セグメント組立て作業」や「機内薬液注入作業」は，今後もシールド工事における重点危険作業である。